

**ESTABILIDAD TRANSITORIA EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA
USANDO MODELOS DE CARGA ESTÁTICO-DINÁMICOS**

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

**CARRERA:
INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de
INGENIERO ELÉCTRICO**

**TEMA:
ESTABILIDAD TRANSITORIA EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA
USANDO MODELOS DE CARGA ESTÁTICO-DINÁMICOS**

**AUTOR:
MÓNICA ESTEFANÍA SANAFRIA JIMÉNEZ**

**DIRECTOR:
CARLOS ANDRÉS BARRERA SINGAÑA**

Quito, Julio 2019

Mónica Estefanía Sanafria Jiménez

**ESTABILIDAD TRANSITORIA EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA
USANDO MODELOS DE CARGA ESTÁTICO-DINÁMICOS**

Universidad Politécnica Salesiana, Quito – Ecuador 2019

Ingeniería Eléctrica

Breve reseña histórica e información de contacto.



Mónica Estefanía Sanafria Jiménez (Y'1991). Realizó sus estudios de nivel secundario en el Colegio “San Francisco de Sales” de la ciudad de Quito. Egresado de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana. Su trabajo se basa en el estudio de estabilidad transitoria usando modelos de carga. msanafria@est.ups.edu.ec

Dirigido por:



Carlos Andrés Barrera Singaña (Y'1989). Realizó sus estudios superiores en la Escuela Politécnica Nacional de Quito, donde se graduó de Ingeniero Eléctrico en Octubre de 2013. Además, cursó estudios de posgrado en la Universidad de Zaragoza, España, donde obtuvo el título en Máster en Energías Renovables y Eficiencia Energética con Especialidad en Sistemas Eléctricos. Actualmente es profesor ocasional a tiempo completo de la Universidad Politécnica Salesiana. cbarrera@ups.edu.ec

Todos los derechos reservados:

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con la autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos o investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS RESERVADOS

©2019 Universidad Politécnica Salesiana

QUITO - ECUADOR

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR

Yo, Carlos Andrés Barrera Singaña declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación “*ESTABILIDAD TRANSITORIA EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA USANDO MODELOS DE CARGA ESTÁTICO-DINÁMICOS*” realizado por Mónica Estefanía Sanafria Jiménez, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito D.M., Julio de 2019



.....
Carlos Andrés Barrera Singaña
C.C.: 0503503336

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, Mónica Estefanía Sanafria Jiménez, con documento de identificación N° 1719593574, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autora del trabajo de grado/titulación intitulado: *“ESTABILIDAD TRANSITORIA EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA USANDO MODELOS DE CARGA ESTÁTICO-DINÁMICOS”*, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, D.M., Julio de 2019



.....
Mónica Estefanía Sanafria Jiménez
C.C.: 1719593574

1. ÍNDICE GENERAL

1	Introducción	2
2	Marco teórico	2
2.1	Estabilidad transitoria en Sistemas Eléctricos de Potencia	2
2.2	Modelos de Carga Estáticos	3
2.2.1	Modelo de carga Exponencial	3
2.2.2	Modelo de carga Polinomial (ZIP).....	4
2.2.3	Modelo de carga Lineal.....	4
2.2.4	Modelo de carga Completo	5
2.2.5	Modelo de carga del Motor de Inducción	5
2.2.6	Modelo de carga con Interfaz de Electrónica de Potencia	5
2.3	Modelos de Carga Dinámicos	6
2.3.1	Modelo de carga Dinámica Exponencial	6
2.3.2	Modelo de carga Dinámico de Motor de Inducción.....	7
2.3.3	Modelo de carga Compuesto.....	7
3	Implementación de modelos en software de simulación.....	8
4	Metodología para utilización de modelos de carga.....	9
5	Simulaciones y análisis de resultados	10
5.1	Simulaciones sin modelos de carga	10
5.1.1	Simulación 1	10
5.1.2	Simulación 2	11
5.2	Simulaciones con modelos de carga estáticos (simulación 1)	12
5.3	Simulaciones con modelos de carga dinámicos (simulación 2).....	13
6	Conclusiones	14
6.1	Trabajos futuros	14
7	Referencias	15
7.1	Matriz de Estado del Arte	17
7.2	Resumen de Indicadores	20
8	Anexos	22

2. ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Circuito utilizado para motor de inducción	5
Figura 2. Circuito utilizado para el modelo de carga con interfaz de electrónica de potencia [6] ..	6
Figura 3. Circuito para el modelo de carga compuesto.....	7
Figura 4. Sistema IEEE de 39 barras [24].....	8
Figura 5. Detalle del ingreso de modelos de carga en DIgSILENT PowerFactory	9
Figura 6. Detalle del ingreso de modelos de carga en PowerWorld	9
Figura 7. Metodología utilizada para estabilidad transitoria.....	9
Figura 8. Metodología aplicada en modelos de carga estáticos	10
Figura 9. Metodología aplicada en modelos de carga dinámicos	10
Figura 10. Ángulos del rotor en DIgSILENT PowerFactory	11
Figura 11. Voltajes en DIgSILENT PowerFactory	11
Figura 12. Ángulos del rotor en PowerWorld.....	11
Figura 13. Voltajes en PowerWorld.....	11
Figura 14. Ángulos del rotor en DIgSILENT PowerFactory	11
Figura 15. Voltajes en DIgSILENT PowerFactory	12
Figura 16. Ángulos del rotor en PowerWorld.....	12
Figura 17. Voltajes en PowerWorld.....	12
Figura 18. Ángulos del rotor - Modelo de carga estático ZIP en DIgSILENT PowerFactory	12
Figura 19. Voltajes - Modelo de carga estático ZIP en DIgSILENT PowerFactory	12
Figura 20. Ángulos del rotor - Modelo de carga estático lineal en PowerWorld	13
Figura 21. Voltajes - Modelo de carga estático lineal en PowerWorld	13
Figura 22. Ángulos del rotor - Modelo de carga dinámico en motor de inducción en DIgSILENT PowerFactory	13
Figura 23. Voltajes en modelo de carga dinámico en motor de inducción en DIgSILENT PowerFactory	13
Figura 24. Ángulo del rotor - Modelo de carga dinámico compuesto en PowerWorld ...	14
Figura 25. Voltaje - Modelo de carga dinámico compuesto en PowerWorld.....	14
Figura 26. Resumen e indicador de la temática - Estado del arte	20

Figura 27. Indicador de formulación del problema - Estado del arte.....	20
Figura 28. Indicador de solución - Estado del arte	21
Figura 29. Sistema IEEE de 39 barras en PowerWorld	25
Figura 30. Sistema IEEE de 39 barras en DIgSILENT PowerFactory	26

3. ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Matriz de estado del arte	17
Tabla 2. Datos generales del Sistema IEEE de 39 barras	22
Tabla 3. Datos de potencia utilizados para modelo de carga estático ZIP en el sistema IEEE de 39 barras.....	23
Tabla 4. Datos de potencia utilizados en el modelo de carga estático lineal del sistema IEEE de 39 barras.....	24
Tabla 5. Datos de potencia utilizados en el modelo de carga dinámico compuesto del sistema IEEE de 39 barras.....	24

ESTABILIDAD TRANSITORIA EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA USANDO MODELOS DE CARGA ESTÁTICO-DINÁMICOS

Resumen

El presente documento tiene como objetivo investigar los modelos de carga estáticos y dinámicos en un sistema eléctrico de potencia para que estos sean empleados en un estudio de estabilidad transitoria, de esta manera los resultados tengan mayor cercanía a la realidad y, es que es un hecho que los modelos de carga han sido muy poco utilizados en la historia de los sistemas de potencia. Los modelos encontrados tanto estáticos como dinámicos son puestos a prueba en los softwares de simulación DIgSILENT PowerFactory y PowerWorld Corporation, encontrándose para un sistema de prueba que los resultados de estudiar la estabilidad transitoria son distintos cuando se emplean modelos de carga, apareciendo inestabilidades, las cuales pueden ser corregidas de mejor manera una vez que la carga es modelada como un componente más real y menos ideal.

Palabras Clave: Estabilidad transitoria, Sistemas eléctricos de potencia, modelo de carga, modelos dinámicos, modelos estáticos.

Abstract

The objective of this document is investigate the static and dynamic load models in an electrical power system to be used in a study of transient stability, to have results closer to reality and, it is a fact that the load models haven't been much used in the history of power systems. Both models static and dynamic are tested in the simulation software DIgSILENT PowerFactory and PowerWorld Corporation, finding for a test system that the results of studying the transient stability are different when using load models, appearing instabilities, which can be corrected in a better way once the load is modeled as a more real and less ideal component.

Keywords: Transient stability, power system, load model, dynamic models, static models.

1 Introducción

La estabilidad transitoria dentro de los SEP es uno de los principales estudios que deben desarrollarse, observando el comportamiento de las distintas variables del SEP y como estas alcanzan o no un nuevo estado estable, luego de que el sistema haya ocurrido una perturbación. Tomando en cuenta la representación del SEP, se puede definir que la carga es aquel elemento que tradicionalmente ha sido modelado como un elemento pasivo que consume potencia de manera constante, lo que representa un modelo estático, estacionario o estable. Este hecho principalmente se atribuye a la complejidad de modelar una carga de manera dinámica. Sin embargo, a lo largo de los años se ha estudiado la importancia del comportamiento dinámico de las cargas, así las representaciones (estacionaria y dinámica) pasan a ser tomadas en cuenta para un estudio de estabilidad transitoria [1][2].

En algunos países se ha aplicado el modelo de carga de corriente constante o una combinación de las mismas con motores de inducción [3]. En un SEP es muy importante el modelado de cargas, aunque la última actualización sistemática de estos modelos se realizó en los años noventa, este modelado en cierto modo ha sido relegado de los estudios clásicos de estabilidad transitoria [4][5]. A pesar de tener investigaciones recientes en los SEP, y reconocer la importancia de un modelado de carga adecuado, se usan modelos estáticos típicos y en modelos de carga dinámica se utilizan modelos estándar de motores de inducción [6].

Tomando en cuenta la robustez del SEP, se deben tomar en cuenta las características de las cargas en fenómenos transitorios como cortocircuitos o rechazos de carga o demás [7]. Añadir la representación matemática de la carga a

un SEP mejora considerablemente los resultados de un estudio eléctrico porque no se deja de lado el efecto de la carga.

En el siguiente trabajo se realiza una investigación sobre los principales modelos de carga tanto estáticos como dinámicos y su implementación en dos softwares de simulación de SEP especializados para desarrollar eventos de simulación en el período transitorio.

La disposición del siguiente documento es la siguiente:

Sección I: Introducción y precedentes sobre estabilidad transitoria con modelos de carga. Sección II: Marco teórico, donde se encuentran las definiciones relacionadas a estabilidad transitoria y se presentan los diferentes modelos de carga estáticos y dinámicos con sus definiciones matemáticas respectivas. Sección III: Implementación de modelos en software de simulación. Sección IV: Análisis de resultados. Sección V: Conclusiones y trabajos futuros. Sección VI: Referencias. Sección VII: Anexos.

2 Marco teórico

2.1 Estabilidad transitoria en Sistemas Eléctricos de Potencia

La estabilidad transitoria en SEP's es de primordial interés en la evaluación de la conducta operativa del sistema, ante eventos de naturaleza corta en duración. La definición de tiempos de actuación entregada por un estudio de estabilidad permiten que las variables del SEP se recuperen de manera adecuada para mantener al mismo lejos de condiciones extremas de operación que puedan derivar en un colapso; es decir, las conclusiones de un estudio de estabilidad transitoria realimentan otros estudios como el de protecciones, usando los tiempos máximos que dejan al sistema estable para coordinar la actuación de los respectivos

relés [8]. La estabilidad generalmente se monitorea mediante las fluctuaciones de ángulo, voltaje y frecuencia, tomando en cuenta el sincronismo del sistema y los rangos en los límites de funcionamiento preestablecidos por el ente operador del SEP [1][9]. Cuando un sistema se somete a una perturbación, la estabilidad depende de la circunstancia en operación inicial y el sistema puede experimentar una alteración en la frecuencia o una alteración en los niveles de voltaje o una combinación de ambos [12][13].

Como se ha mencionado anteriormente, un estudio de estabilidad transitoria de manera clásica no considera los distintos modelos que puede tener una carga, los cuales netamente dependen del voltaje y la frecuencia [14][15]. Siendo el voltaje aquella variable de estado que afecta de sobremanera a la potencia consumida por la carga, por encima de la frecuencia [10][11]. Los modelos de la carga pueden ser estáticos y dinámicos, siendo la diferencia entre estos, la dependencia con el tiempo.

2.2 Modelos de Carga Estáticos

Carga es aquel dispositivo que se conecta a un punto del sistema eléctrico y se caracteriza por consumir energía, obteniendo de este una potencia (Potencia Activa (P) y/o Potencia Reactiva (Q)).

Los modelos estáticos de carga tienen la característica de que la potencia tanto activa como reactiva no dependen del tiempo.

Estos modelos expresan la potencia tanto activa como reactiva en un momento definido del tiempo y se utilizan generalmente en cargas resistivas y de iluminación; además como aproximación a un motor de inducción en estado estacionario [2][16].

Las cargas que expresan cambios simples, con respecto al voltaje y la frecuencia de la barra del SEP en el cual

se conectan, de manera general pueden ser mencionadas con las siguientes expresiones:

$$P = f_P(V, f) \quad (1)$$

$$Q = f_Q(V, f) \quad (2)$$

En la ecuación (1) se indica el modelo de carga estático de potencia activa y en la ecuación (2) se visualiza el modelo de carga estático de la potencia reactiva [6][17]; en ambos casos indicando que la potencia es una función de voltaje y de la frecuencia en la barra del SEP al cual se conecta la carga.

Sin embargo, en el período o estado estacionario no existen cambios en la frecuencia del SEP, por lo tanto, los siguientes modelos dejan de lado la vinculación de la carga con la frecuencia, y solamente se indican los modelos en función de la magnitud del voltaje.

2.2.1 Modelo de carga Exponencial

Es un modelo muy utilizado en cargas estáticas, representan modelos matemáticos exponenciales, donde a la potencia a voltaje nominal se multiplica por la relación de voltajes elevado a una constante, la cual depende del tipo de carga.

$$P = P_n \left(\frac{V}{V_n} \right)^{k_{pu}} \quad (3)$$

$$Q = Q_n \left(\frac{V}{V_n} \right)^{k_{qu}} \quad (4)$$

Dónde:

P	Potencia activa en función del voltaje.
Q	Potencia reactiva en función del voltaje.
V	Magnitud del voltaje de la barra donde se conecta la carga.
V_n	Voltaje nominal de la carga.
P_n	Potencia activa a voltaje nominal.
Q_n	Potencia reactiva a voltaje nominal.
k_{pu} y k_{qu}	Exponentes que describen el cambio de la potencia de carga.

Los exponentes k_{pu} y k_{qu} representan las derivadas de P y Q en [p.u.] [2][6][17].

2.2.2 Modelo de carga Polinomial (ZIP)

El siguiente modelo se interpreta con un polinomio de segundo grado, también conocido como ZIP por su representación de coeficientes de impedancia, corriente y potencia constantes.

$$P = P_n * \left[p_1 * \left(\frac{V}{V_n} \right)^2 + p_2 * \left(\frac{V}{V_n} \right) + p_3 \right] \quad (5)$$

$$Q = Q_n * \left[q_1 * \left(\frac{V}{V_n} \right)^2 + q_2 * \left(\frac{V}{V_n} \right) + q_3 \right] \quad (6)$$

Dónde:

p_1 y q_1	Representa la participación relativa de la carga de impedancia constante.
p_2 y q_2	Representa la participación relativa de la carga de corriente constante.

p_3 y q_3 Representa la participación relativa de la carga de potencia constante.

Las ecuaciones (5) y (6) expresan el modelo de carga ZIP en P y Q respectivamente. Este modelo es aquel que tiene mayor utilización a nivel de simulaciones estáticas pues reúne las características de las cargas, como lo son: impedancia, corriente y potencia constantes.

Este modelo debe tomar en cuenta las restricciones representadas en las ecuaciones (7) y (8) [6][17][18]:

$$p_1 + p_2 + p_3 = 1 \quad (7)$$

$$q_1 + q_2 + q_3 = 1 \quad (8)$$

2.2.3 Modelo de carga Lineal

Utilizado cuando el voltaje varía muy poco con respecto al voltaje nominal, por lo que si las variaciones son muy grandes este modelo no es factible de ser utilizado.

$$P = P_n * \left[p_3 + p_2 * \left(\frac{V}{V_n} \right) \right] \quad (9)$$

$$Q = Q_n * \left[q_3 + q_2 * \left(\frac{V}{V_n} \right) \right] \quad (10)$$

Las ecuaciones (9) y (10) expresan el modelo de carga lineal para P y Q respectivamente. Es un caso particular del modelo ZIP.

Dónde:

p_2 y q_2	Representa la participación relativa de la carga de corriente constante.
p_3 y q_3	Representa la participación relativa de la carga de potencia constante.

Teniendo como restricciones [6][17] a las ecuaciones (11) y (12):

$$p_2 + p_3 = 1 \quad (11)$$

$$q_2 + q_3 = 1 \quad (12)$$

2.2.4 Modelo de carga Completo

Cuando se pretende modelar las cargas a voltajes excesivamente pequeños que son consecuencias de las cargas estables de televisores de alta gama, contactores magnéticos de acondicionadores de aire. Esta modelación de carga completa está dada por la ecuación (13):

$$P = P_n * [P_{ZIP} + P_{EXP1} + P_{EXP2}] \quad (13)$$

Donde:

$$P_{ZIP} = \left[p1 * \left(\frac{V}{V_n} \right)^2 + p2 * \left(\frac{V}{V_n} \right) + p3 \right] \quad (14)$$

$$P_{EXP1} = \left[p4 * \left(\frac{V}{V_n} \right)^{a1} \right] \quad (15)$$

$$P_{EXP2} = \left[p5 * \left(\frac{V}{V_n} \right)^{a2} \right] \quad (16)$$

Este modelo expresa el comportamiento combinado de una representación ZIP con dos exponenciales. Las ecuaciones (14), (15) y (16) representan la modelación ZIP (P_{ZIP}) de carga completa y modelación exponencial (P_{EXP1}, P_{EXP2}) de este modelo[6][17].

2.2.5 Modelo de carga del Motor de Inducción

Este modelo se lo utiliza en sistemas de alto componente industrial ya que los motores ocupan el 70% de la demanda total. Este modelo se basa en el circuito similar al ilustrado en la Figura 1.

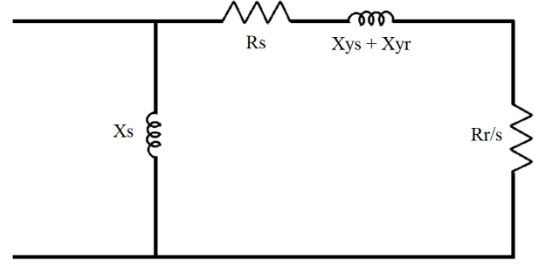


Figura 1. Circuito utilizado para motor de inducción

Dónde:

R_s	Resistencia del estator.
R_r	Resistencia del rotor.
X_{ys}	Reactancia de dispersión del estator.
X_{yr}	Reactancia de dispersión del rotor.
X_m	Reactancia de magnetización.
s	Deslizamiento del motor.
w_s	Velocidad angular sincrónica.
w_r	Velocidad angular del rotor.

$$P = \left(R_s + \frac{R_r}{s} \right) \frac{V^2}{\left(R_s + \frac{R_r}{s} \right)^2 + (X_{ys} + X_{yr})^2} \quad (17)$$

$$Q = (X_{ys} + X_{yr}) \frac{V^2}{\left(R_s + \frac{R_r}{s} \right)^2 + (X_{ys} + X_{yr})^2} + \frac{V^2}{X_s} \quad (18)$$

Las ecuaciones (17) y (18) representan el modelo para el motor de inducción de P y Q respectivamente en estado estacionario [6][17][19][16].

2.2.6 Modelo de carga con Interfaz de Electrónica de Potencia

Debido al aumento de las cargas electrónicas en la demanda del sistema, este modelo ha sido muy utilizado últimamente en abastecimiento de

potencia, luces LED, lámparas fluorescentes, cargas de motores estables y trifásicos regulados.

Estos se representan mediante el circuito similar al ilustrado en la Figura 2 [20].

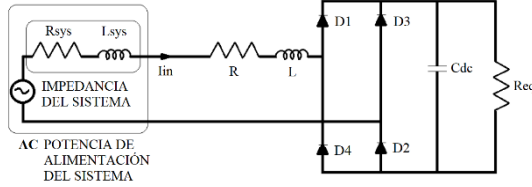


Figura 2. Circuito utilizado para el modelo de carga con interfaz de electrónica de potencia [6]

2.3 Modelos de Carga Dinámicos

El modelo manifiesta la conducta de P y Q reactiva en cualquier momento de tiempo tomando en cuenta valores de voltaje y frecuencia, aplicándose principalmente ecuaciones diferenciales en la representación matemática del consumo de potencia [16].

2.3.1 Modelo de carga Dinámica Exponencial

Este modelo se basa en formas genéricas que se derivan de los motores de inducción, cargas de calefacción y cambiadores de tomas después de un desfase de voltaje, mientras $P_s(V)$, $P_t(V)$, $Q_s(V)$ y $Q_t(V)$ se definen utilizando funciones exponenciales.

Al suponer un cambio de voltaje se obtienen las ecuaciones de potencia activa (19) y (20) y las ecuaciones de potencia reactiva (21) y (22):

$$\begin{aligned} T_p \frac{dP_r}{dt} + P_n &= P_s(V) - P_t(V) \\ &= P_n \left(\frac{V}{V_n} \right)^{\alpha_s} \\ &\quad - P_n \left(\frac{V}{V_n} \right)^{\alpha_t} \end{aligned} \quad (19)$$

$$P_l = P_r + P_n \left(\frac{V}{V_n} \right)^{\alpha_t} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} T_q \frac{dQ_r}{dt} + Q_n &= Q_s(V) - Q_t(V) \\ &= Q_n \left(\frac{V}{V_n} \right)^{\beta_s} \\ &\quad - Q_n \left(\frac{V}{V_n} \right)^{\beta_t} \end{aligned} \quad (21)$$

$$Q_l = Q_r + Q_n \left(\frac{V}{V_n} \right)^{\beta_t} \quad (22)$$

Dónde:

P_r	Recuperación de potencia activa.
P_n	Valor inicial de potencia activa antes del cambio de voltaje.
V_n	Valor de voltaje inicial.
T_p	Constante de tiempo de recuperación de potencia activa.
α_s	Exponente de voltaje de potencia activa de estado estable.
α_t	Exponente transitorio de la potencia activa.
P_t	Consumo de potencia activa de la carga.
Q_r	Recuperación de la potencia reactiva.
Q_n	Valor inicial de la potencia reactiva antes del cambio de voltaje.
T_q	Constante de tiempo de recuperación de potencia reactiva.
β_s	Exponente de voltaje de potencia reactiva de estado estable.
β_t	Exponente transitorio de la potencia reactiva.
Q_l	Consumo de potencia reactiva de la carga.

Los resultados son adecuados al utilizar este método a largo plazo y para variaciones de voltaje limitadas en barras

de carga [2][6][21][22]. Se puede linealizar el modelo de carga dinámica obteniendo la ecuación (23) y (24):

$$\Delta P_I = \frac{P_n}{V_n} \alpha_s * \frac{\left(\frac{\alpha_t}{\alpha_s} T_p s + 1\right)}{(T_p s + 1)} * \Delta V \quad (23)$$

$$\Delta Q_I = \frac{Q_n}{V_n} \beta_s * \frac{\left(\frac{\beta_t}{\beta_s} T_q s + 1\right)}{(T_q s + 1)} * \Delta V \quad (24)$$

2.3.2 Modelo de carga Dinámico de Motor de Inducción

Es utilizado cuando la participación de carga residencial es poco significativa con respecto a la carga total. Los motores de inducción (IM) trifásicos se definen por las siguientes ecuaciones [1][2][6][23].

$$V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\psi_{ds}}{d\tau} + \omega_s \psi_{qs} \quad (25)$$

$$V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d\psi_{qs}}{d\tau} + \omega_s \psi_{ds} \quad (26)$$

$$V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d\psi_{dr}}{d\tau} - (\omega_s - \omega) \psi_{qr} \quad (27)$$

$$V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d\psi_{qr}}{d\tau} + (\omega_s - \omega) \psi_{dr} \quad (28)$$

$$\frac{d\omega}{d\tau} = \frac{(M_e - M)}{\omega_b T_m} \quad (29)$$

$$\psi_{ds} = X_s I_{ds} + X_m I_{dr} \quad (30)$$

$$\psi_{qs} = X_s I_{qs} + X_m I_{qr} \quad (31)$$

$$\psi_{dr} = X_m I_{ds} + X_r I_{dr} \quad (32)$$

$$\psi_{qr} = X_m I_{qs} + X_r I_{qr} \quad (33)$$

Donde:

V_{ds} y V_{qs}	Componentes de voltaje del estator.
V_{dr} y V_{qr}	Componentes de voltaje del rotor.
I_{ds} y I_{qs}	Componentes de corriente del estator.
I_{dr} y I_{qr}	Componentes de corriente del rotor.
ψ_{ds} y ψ_{qs}	Enlaces de flujo del estator.
ψ_{dr} y ψ_{qr}	Enlace de flujo del rotor.
R_s	Resistencia del estator.
R_r	Resistencia del rotor.
X_s	Reactancia del estator.
X_r	Reactancia del rotor.
X_{ys}	Reactancia de fuga del estator.
X_{yr}	Reactancia de fuga del rotor.
X_m	Reactancia de magnetización.
ω_s	Velocidad angular sincrónica.
ω	Velocidad angular del rotor.
ω_b	Frecuencia angular base.
M	Torque de carga mecánica.
τ	Tiempo normalizado.
T_m	Constante de tiempo mecánico del motor.
M_e	Torque electromecánico.

2.3.3 Modelo de carga Compuesto

El modelo representa una combinación de los modelos estáticos y dinámicos, las ecuaciones equivalentes utilizadas se derivan del circuito presentado en la Figura 3.

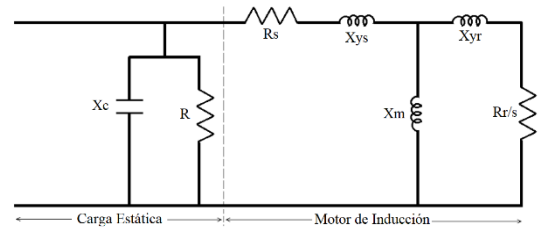


Figura 3. Circuito para el modelo de carga compuesto.

Esta representación tiene carga estática representada por una conductancia y susceptancia en paralelo. La complejidad del modelo depende de la composición de la carga, por ejemplo si un alimentador tiene una alta componente industrial, esta tiene mayor preponderancia que una carga lineal por ejemplo, la cual es característica de un usuario residencial [6][13][23].

$$P_s^* = P_z^* \left(\frac{V}{V_n} \right)^2 + P_l^* \left(\frac{V}{V_n} \right) + P_p^* \quad (34)$$

$$Q_s^* = Q_z^* \left(\frac{V}{V_n} \right)^2 + Q_l^* \left(\frac{V}{V_n} \right) + Q_q^* \quad (35)$$

$$P_z^* + P_l^* + P_p^* = 1 - K_{pm} \quad (36)$$

$$Q_z^* + Q_l^* + Q_p^* = 1 - \frac{Q_{motor}}{Q_n} \quad (37)$$

Donde K_{pm} es la relación de la carga inicial del motor y Q_{motor} es la potencia reactiva inicial consumida [6] [23]

3 Implementación de modelos en software de simulación

Las cargas normalmente en un estudio eléctrico tradicional, sea dependiente o independiente del tiempo se consideran como estáticas y de potencia constante, pero la realidad es que sus consumos son muy variables como se indica en los modelos presentados con anterioridad. Al emplearse las representaciones descritas en este trabajo es posible estudiar al sistema de potencia en estado transitorio con una aproximación más cercana a la realidad

Para analizar la estabilidad transitoria de un SEP se realizan diferentes eventos de cortocircuitos que presentan distintas respuestas del comportamiento del sistema. Los softwares para simular al

SEP en fenómenos transitorios son DIgSILENT PowerFactory y Power World, en ambos casos es posible usar varias representaciones en las cargas.

Para el efecto deseado se utiliza como modelo de prueba el sistema IEEE de 39 barras representado en la Figura 4.4.

El sistema consta de 39 barras, 10 generadores, 12 transformadores trifásicos y 46 líneas de transmisión. Este sistema tiene una base de 100 MVA y sus datos generales se detallan en la Tabla 2.

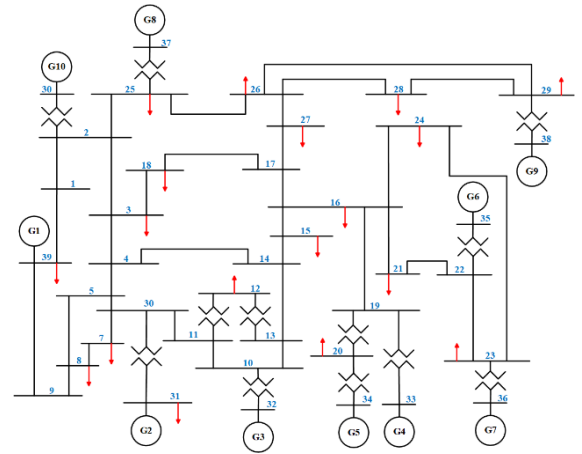


Figura 4. Sistema IEEE de 39 barras [24]

En DIgSILENT PowerFactory, la implementación de los modelos de carga se ejecuta en la Figura 5, mientras que en PowerWorld, la representación de los modelos de carga se ilustra en la Figura 6.

Percentage
 Static (const Z) 95 %
 Dynamic 5 % ☒ Nonlinear Model

Dynamic Load Time Constant 10. s

Dynamic Load
 Frequency Dependence, kpf 0. kqf 0.
 Frequency Time Constant, tpf 0. s tqf 0. s
 Voltage Time Constant, tpu 0. s tqu 0. s

Voltage Dependence of P
 Coefficient aP 0.5 Exponent e_aP 0.
 Coefficient bP 0.25 Exponent e_bP 1.
 Coefficient cP 0.25 Exponent e_cP 2.

Voltage Dependence of Q
 Coefficient aQ 0.25 Exponent e_aQ 0.
 Coefficient bQ 0.25 Exponent e_bQ 1.
 Coefficient cQ 0.5 Exponent e_cQ 2.

Voltage Limits
 Upper Voltage Limit 1.2 p.u.
 Lower Voltage Limit 0.8 p.u.

Figura 5. Detalle del ingreso de modelos de carga en DlgSILENT PowerFactory

Bus Number 12 Find By Number Status
 Bus Name 12 Find By Name ☐ Open
 ID 1 Find ... ☒ Closed
 Labels ... no labels Energized
☐ NO (Offline)
☒ YES (Online)

Area	Zone	Substation	Owner
1	1		1

Load Information OPF Load Dispatch Custom Stability

Load Model Group: none Remove Change...
 Dist Equivalent: none Remove Change...
 Dist Equiv MVA Base: 0,000 Zero means to default to Mbase of Dist Equivalent Model

Load Characteristics Load Relays Distributed Gen Terminal and State Values

Insert Delete Show Block Diagram Set to Defaults

Type Active - BPA_Type_LB ☒ Active (Only One Active, Except for Supplementar

Parameters

P1	0,00000	dPdFreq	0,00000
Q1	0,00000	dQdFreq	0,00000
P2	0,75000		
Q2	0,25000		
P3	0,25000		
Q3	0,75000		

Show Torque Speed Dialog

Figura 6. Detalle del ingreso de modelos de carga en PowerWorld

4 Metodología para utilización de modelos de carga

Para el uso de modelos implementados para estabilidad transitoria en cualquier software de simulación de sistemas de

potencia se implementa la siguiente metodología:

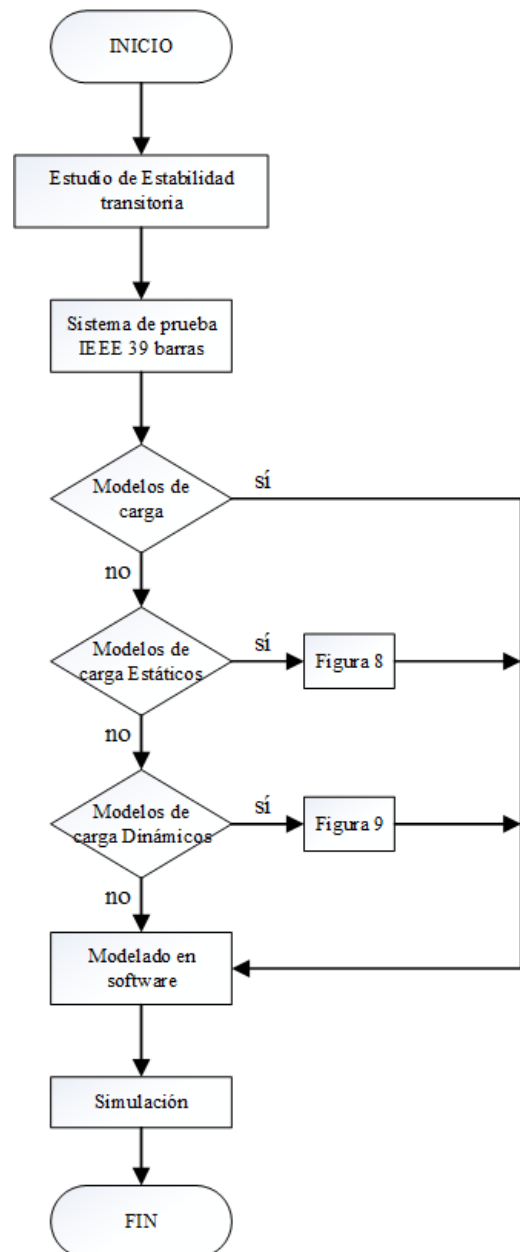


Figura 7. Metodología utilizada para estabilidad transitoria

Esta metodología es el resultado de analizar la forma de entrada de modelos de carga en simuladores. Los pasos de esta metodología se presentan de manera general, cuyo punto de partida es conocer el tipo de carga asociada a un usuario o consumidor. Dentro de la filosofía de

modelación de carga, esta información es primordial, ya que de esto se puede escoger un modelo o lineal o exponencial o ZIP entre otros.

En la figura 8 y 9 se detalla la metodología utilizada para aplicar los modelos estáticos y dinámicos respectivamente simulados en los softwares PowerWorld y DlgSILENT PowerFactory.

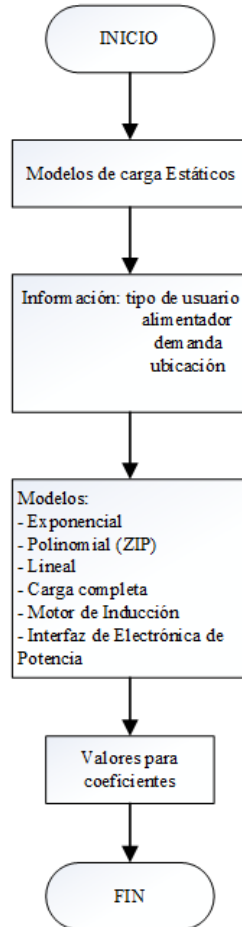


Figura 8. Metodología aplicada en modelos de carga estáticos

5 Simulaciones y análisis de resultados

En primera instancia, en este trabajo se realizan simulaciones para ambos softwares propuestos sin emplear ninguna representación matemática para las cargas; estos resultados permiten establecer las principales diferencias y efectos de incluir las cargas de manera

completa, es decir con una variación de su consumo tanto en potencia activa como reactiva conforme existan cambios de voltaje y/o frecuencia en el SEP.

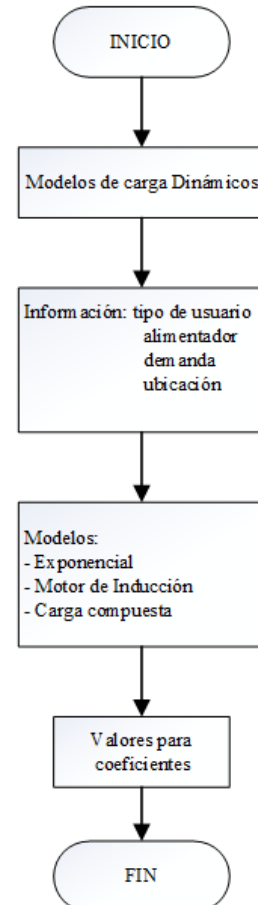


Figura 9. Metodología aplicada en modelos de carga dinámicos

Los resultados se analizan de forma gráfica mostrando el ángulo del rotor en dos generadores y el voltaje en dos barras, esto debido a que se necesita apreciar el efecto de las cargas en la estabilidad del SEP propuesto.

5.1 Simulaciones sin modelos de carga

5.1.1 Simulación 1

El estudio de estabilidad transitoria dentro del sistema propuesto en primera instancia consta de un cortocircuito trifásico, despejado mediante la

desconexión de los interruptores asociados a la barra 16 en 0.01 [s], con una duración de la simulación de 5 [s].

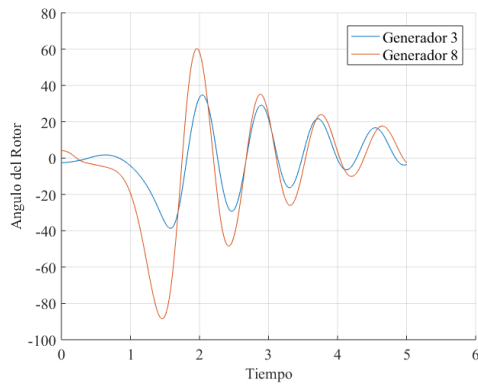


Figura 10. Ángulos del rotor en DiGSILENT PowerFactory

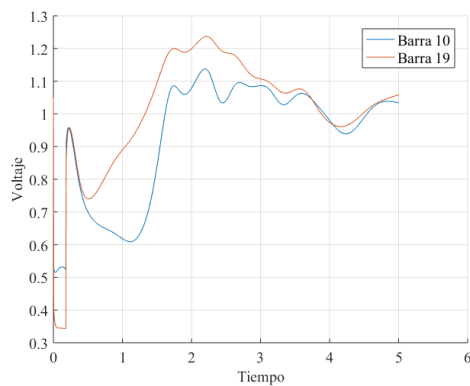


Figura 11. Voltajes en DiGSILENT PowerFactory

En las Figuras 10 y 11 se puede observar el comportamiento de ángulos y voltajes en el software DiGSILENT PowerFactory que se muestran estables a medida que transcurre el tiempo.

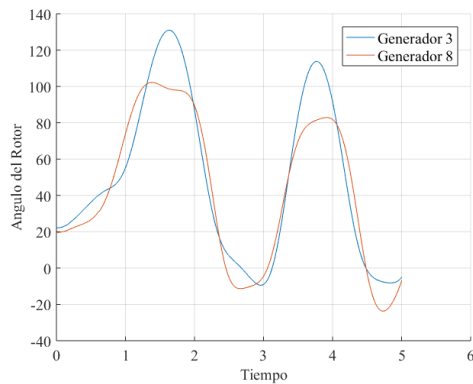


Figura 12. Ángulos del rotor en PowerWorld

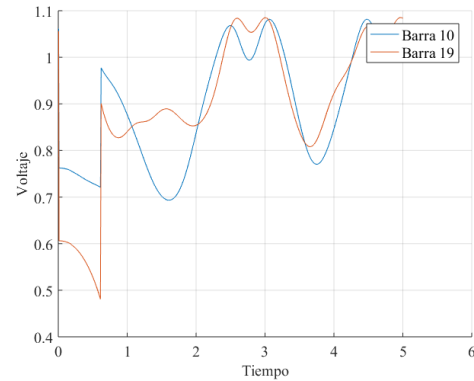


Figura 13. Voltajes en PowerWorld

En las Figuras 12 y 13 se puede observar el comportamiento de ángulos y voltajes simulados en el software PowerWorld el cual deriva en estabilidad para el tiempo de despeje propuesto.

5.1.2 Simulación 2

Una segunda simulación consiste en un cortocircuito trifásico en la barra 31, con un tiempo de despeje de 0.01 [s] y un tiempo de simulación total de 5 [s].

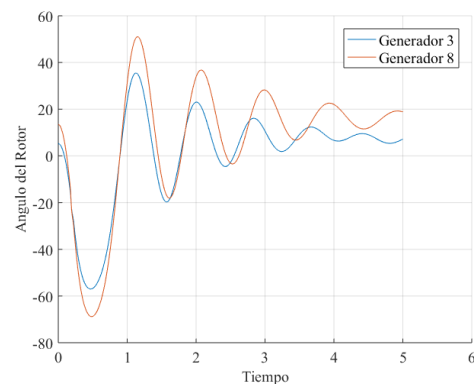


Figura 14. Ángulos del rotor en DiGSILENT PowerFactory

En las Figuras 14 y 15 se puede apreciar el comportamiento de ángulos y voltajes en el software DiGSILENT PowerFactory que muestran una estabilidad luego de haber ocurrido el evento de cortocircuito.

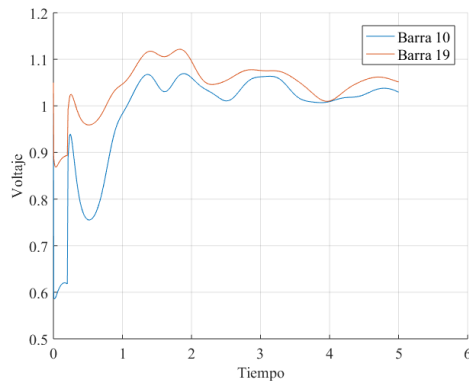


Figura 15. Voltajes en DIGSILENT PowerFactory

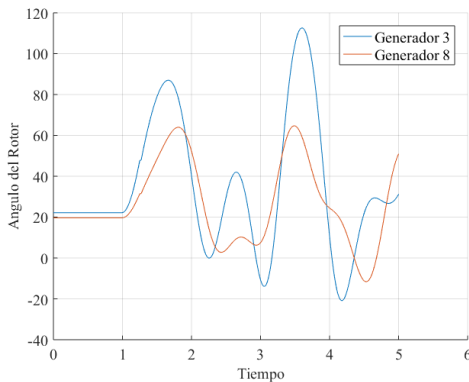


Figura 16. Ángulos del rotor en PowerWorld

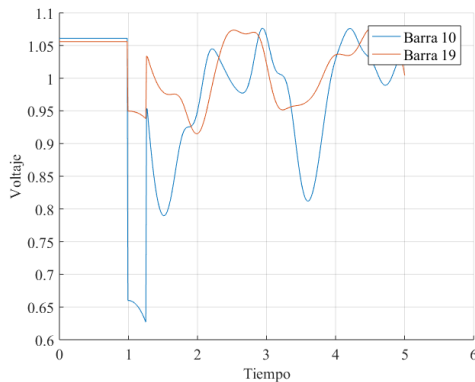


Figura 17. Voltajes en PowerWorld

En las Figuras 16 y 17 se puede observar el comportamiento de ángulos y voltajes simulados en el software PowerWorld, el cual deriva en una estabilidad para el tiempo de despeje propuesto.

5.2 Simulaciones con modelos de carga estáticos (simulación 1)

En la Figura 18 se puede observar los resultados del ángulo del rotor en los

generadores 3 y 8 después de aplicar el modelo de carga estático ZIP tomando en consideración los valores de la Tabla 3 para asignar los coeficientes al modelo.

El comportamiento del SEP ante este cortocircuito deriva en una inestabilidad, este resultado tiene mayor precisión que aquel desarrollado sin modelos de carga.

Este aspecto de inestabilidad es irrelevante en este trabajo, puesto que está en análisis la respuesta del SEP ante el mismo evento, pero incluyéndose representación detallada en las cargas.

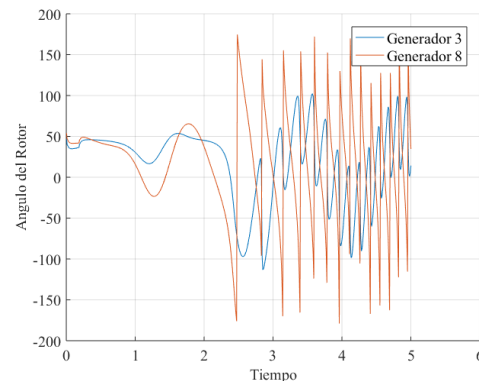


Figura 18. Ángulos del rotor - Modelo de carga estático ZIP en DIGSILENT PowerFactory

En la Figura 19 se puede apreciar la conducta del voltaje en las barras 10 y 19 aplicando modelo de carga estático ZIP tomando en consideración los valores de la Tabla 3. Al aplicar impedancia (p_1 y q_1), corriente (p_2 y q_2) y potencia (p_3 y q_3) constantes el voltaje es inestable.

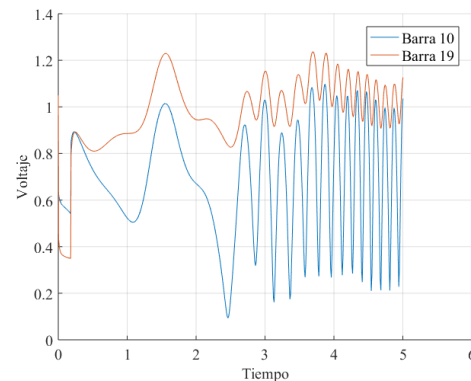


Figura 19. Voltajes - Modelo de carga estático ZIP en DIGSILENT PowerFactory

En la Figura 20 se visualiza la conducta del ángulo del rotor en los generadores 3 y 8 aplicando el modelo de carga estático lineal tomando en consideración los valores de la Tabla 4 la desconexión de los interruptores asociados a la barra 16, donde se puede observar un comportamiento oscilante de los ángulos, siendo este un caso estable.

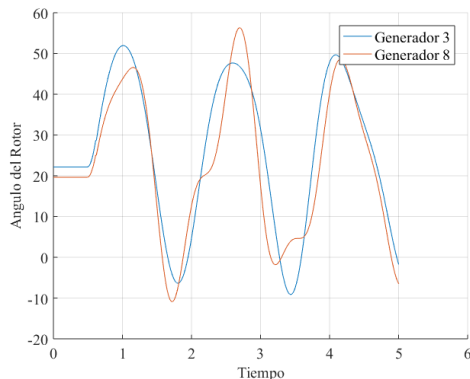


Figura 20. Ángulos del rotor - Modelo de carga estático lineal en PowerWorld

En la Figura 21 se visualiza la conducta del voltaje en las barras 10 y 19 aplicando el modelo de carga estática lineal tomando en consideración los valores de la Tabla 3.

En este caso se puede observar la estabilidad que tiene el voltaje con respecto al tiempo de despeje asignado.

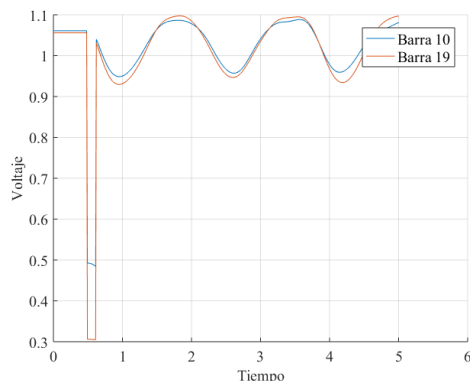


Figura 21. Voltajes - Modelo de carga estático lineal en PowerWorld

5.3 Simulaciones con modelos de carga dinámicos (simulación 2)

Mediante la ejecución de la simulación dos en los softwares se puede encontrar las respuestas tanto para ángulos como para voltajes indicados en las figuras anteriores.

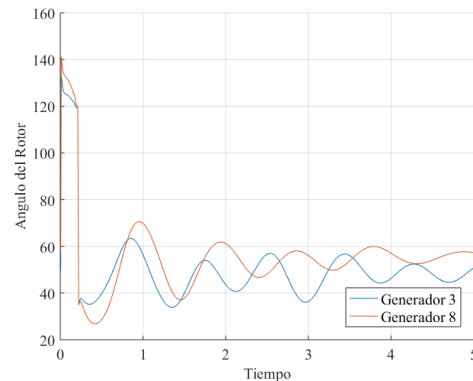


Figura 22. Ángulos del rotor - Modelo de carga dinámico en motor de inducción en DigSILENT PowerFactory

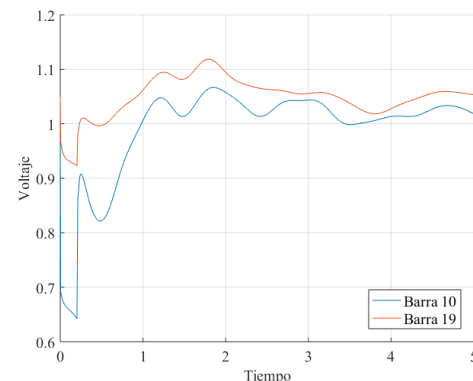


Figura 23. Voltajes en modelo de carga dinámico en motor de inducción en DigSILENT PowerFactory

En las Figuras 22 y 23 se observa la conducta del ángulo del rotor en generadores 3 y 8 y voltajes de las barras 10 y 10 utilizando el modelo de carga dinámico en motor de inducción con una resistencia del rotor equivalente a 0.0163 [p.u.], reactancia del rotor de 0.196 [p.u.], torque mecánico de 3 [p.u.] y tiempo normalizado de 1 [s]. Como resultado de todos los datos ingresados se puede observar que en el sistema se tienen ángulos del rotor y voltajes estables.

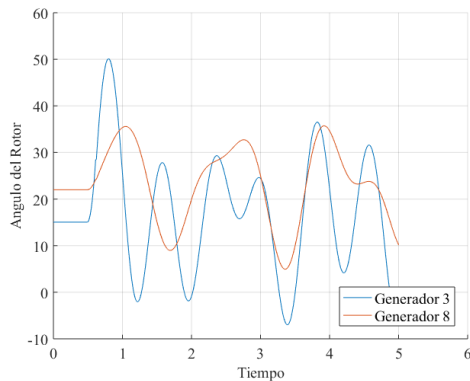


Figura 24. Ángulo del rotor - Modelo de carga dinámico compuesto en PowerWorld

En la Figura 24 se presenta la conducta del ángulo del rotor en generadores 3 y 8 utilizando el modelo de carga dinámico compuesto tomando los valores de la Tabla 5, donde se puede observar un sistema estable a pesar de las oscilaciones existentes.

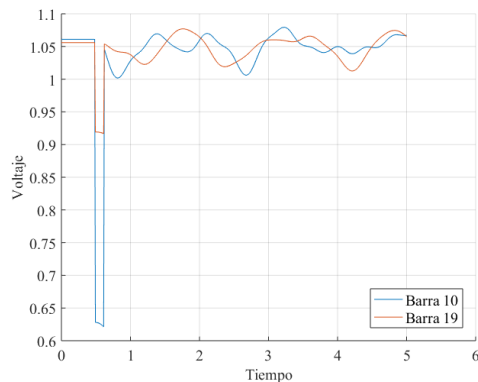


Figura 25. Voltaje - Modelo de carga dinámico compuesto en PowerWorld

En la Figura 25 se observa el comportamiento de voltaje en los generadores 3 y 8 utilizando el modelo de carga dinámico compuesto tomando los valores de la Tabla 5 donde se puede observar una estabilidad tomando en cuenta el tiempo de despeje asignado.

Los resultados generales del estudio de estabilidad transitoria indican que los modelos de carga tanto estáticos como dinámicos afectan notoriamente al sistema y se pueden aplicar en diferentes

softwares obteniendo el comportamiento del SEP más cercano a la realidad.

6 Conclusiones

La aplicación de modelos de carga tanto estáticos como dinámicos permite mejorar los resultados de un estudio de estabilidad en cualquier sistema eléctrico, permitiendo al mismo contar con representaciones más completas en todos sus componentes.

Al analizar un SEP es primordial saber el comportamiento de las cargas ya que no todas son estáticas, existe siempre un dinamismo por motores de inducción o alguna variación por el uso que se le dé a cada carga.

La metodología propuesta abarca tanto a cargas estáticas como dinámicas y es potestad de quien esté desarrollando el estudio de estabilidad la decisión de cual modelo de carga usar en función de la carga característica de un usuario o de un alimentador en su totalidad.

6.1 Trabajos futuros

Los resultados obtenidos en este documento se pueden utilizar como preámbulo para investigaciones como:

Análisis mediante una comparación entre los resultados obtenidos aplicando los mismos modelos de carga en diferentes softwares.

Los modelos de carga detallados en este trabajo se pueden emplear en estudios de estabilidad de frecuencia, apoyando así a la configuración de reguladores de velocidad de generadores sincrónicos.

Los modelos estáticos pueden ser incorporados en diferentes estudios en un SEP o estabilidad de voltaje de largo plazo, dado que la carga depende directamente del voltaje y, estos dos estudios utilizan representaciones netamente estacionarias.

7 Referencias

- [1] W. Xu, Y. Mansour, and B. C. Hydro, "Voltage stability analysis using generic dynamic load models," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 9, no. 1, pp. 479–493, 1994.
- [2] T. Aboul-Seoud and J. Jatskevich, "Dynamic modeling of induction motor loads for transient voltage stability studies," *2008 IEEE Electr. Power Energy Conf. - Energy Innov.*, 2008.
- [3] H. A. N. Dong and H. E. Renmu, "Effect of Uncertainties in Parameters of Load Model on Dynamic Stability Based on Probabilistic Collocation Method," pp. 1100–1104, 2007.
- [4] I. M. Author, "Modeling of a Multi-Machine System Aided with Power System Stabilizers and Shunt Compensator for Transient Stability Enhancement," *2017 Int. Conf. Energy, Commun. Data Anal. Soft Comput.*, pp. 1716–1721, 2017.
- [5] S. R. Moasheri, "Using Fuzzy Logic Power System Stabilizer and Static VAR Compensator to Improve Power System Transient Stability," *45th Int. Univ. Power Eng. Conf. UPEC2010*, pp. 1–5.
- [6] J. V Milanović *et al.*, *Modelling and Aggregation of Loads in Flexible Power Networks*, no. February. 2014.
- [7] O. C. Zevallos and R. B. Prada, "Evaluation of Voltage Stability under Loss of Voltage Control," *2015 IEEE Thirty Fifth Cent. Am. Panama Conv. (CONCAPAN XXXV)*, no. Concapan Xxxv, pp. 1–6, 2015.
- [8] S. Keskes, W. Bahloul, and M. B. A. Kammoun, "Transient stability enhancement of power system equipped with Power System Stabilizer by Static VAR Compensator," *2014 5th Int. Renew. Energy Congr.*, pp. 1–6, 2014.
- [9] S. Polster and H. Renner, "Voltage stability monitoring methods for distribution grids using the thevenin impedance," *Cired*, vol. 2017, no. June, pp. 12–15, 2017.
- [10] Y. Kan and Θ. Ω, "Static Characteristic of Load Effects on Voltage Stability of Electric System," *2012 Int. Conf. Syst. Sci. Eng.*, no. 6, pp. 596–599, 2012.
- [11] H. Bao and X. Guo, "Static Voltage Stability Analysis Based on D-S Evidence Theory for Power System with Wind," *2018 Int. Conf. Power Syst. Technol.*, pp. 384–389, 2018.
- [12] R. A. Zahidi, I. Z. Abidin, H. Hashim, Y. R. Omar, N. Ahmad, and A. M. Ali, "Study of Static Voltage Stability Index as an Indicator for Under Voltage Load Shedding Schemes," *2009 3rd Int. Conf. Energy Environ.*, no. December, pp. 256–261, 2009.
- [13] N. England, "Method of Combined Static and Dynamic Analysis of Voltage Collapse in Voltage Stability Assessment," pp. 1–6, 2005.
- [14] M. Moghawemi, "Effects of Facts Devices on Static Voltage Stability," 2000.
- [15] Z. Man, Z. Jinghong, W. Wenzhuo, and D. A. I. Mengting, "Research on static voltage stability based on EV charging station load modeling," *2011 Int. Conf. Adv. Power Syst. Autom. Prot.*, vol. 2, no. 1, pp. 1094–1099, 2011.
- [16] L. Representation, F. O. R. Dynamic, and P. Analysis, "LOAD REPRESENTATION FOR DYNAMIC PERFORMANCE

- ANALYSIS,” vol. 8, no. 2, pp. 472–482, 1993.
- [17] C. Javier Jiménez Salazar, “Incorporación de Modelos de Carga en Estado Estable Para el Cálculo de Flujos de Potencia,” p. 170, 2018.
 - [18] M. Leinakse and J. Kilter, “Conversion Error of Exponential to Second Order Polynomial ZIP Load Model Conversion,” *2018 IEEE Int. Conf. Environ. Electr. Eng. 2018 IEEE Ind. Commer. Power Syst. Eur. (EEEIC / I&CPS Eur.*, no. 2, pp. 1–5, 2018.
 - [19] Y. Fan, S. Liu, L. Qin, H. Li, and H. Qiu, “A novel online estimation scheme for static voltage stability margin based on relationships exploration in a large data set,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 30, no. 3, pp. 1380–1393, 2015.
 - [20] A. Gaikwad, P. Markham, and P. Pourbeik, “Implementation of the WECC Composite Load Model for utilities using the component-based modeling approach,” *Proc. IEEE Power Eng. Soc. Transm. Distrib. Conf.*, vol. 2016–July, pp. 0–4, 2016.
 - [21] S. L. Models, P. Flow, and D. P. Simulation, “Standard Load Models for Power Flow and Dynamic Performance Simulation IEEE Task Force on Load Representation for Dynamic Performance* System Dynamic Performance Subcommittee Power System Engineering Committee,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 10, no. 3, pp. 1302–1313, 1995.
 - [22] E. Palmer, “Bibliography on load models for power flow and dynamic performance simulation,” vol. 12, no. 2, pp. 27–54, 1995.
 - [23] L. M. Korunovic, S. Sterpu, S. Djokic, K. Yamashita, S. M. Villanueva, and J. V. Milanovic, “Processing of load parameters based on existing load models,” *IEEE PES Innov. Smart Grid Technol. Conf. Eur.*, pp. 1–6, 2012.
 - [24] S. Azizi, M. Sanaye-Pasand, and M. Paolone, “Locating Faults on Untransposed, Meshed Transmission Networks Using a Limited Number of Synchrophasor Measurements,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 31, no. 6, pp. 4462–4472, 2016.

7.1 Matriz de Estado del Arte

Tabla 1. Matriz de estado del arte

ESTABILIDAD TRANSITORIA EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA USANDO MODELOS DE CARGA ESTÁTICO-DINÁMICOS																																														
ITEM	DATOS			TEMÁTICA						FORMULACIÓN DEL PROBLEMA FUNCIONES OBJETIVO					RESTRICCION ES DEL PROBLEMA		PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA										SOLUCIÓN PROPUESTA																			
	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	Estabilidad de Voltaje	Flujos de potencia	Modelos de cargas estáticas	Modelos de cargas dinámicas	Motores de Inducción	Generadores Sincronos	redes de transmisión y subtransmisión	Monitoreo redes de subtransmisión	Comportamiento de generadores	Comportamiento de motores de Inducción	Estabilidad de voltaje a largo plazo	Incapacidad de Modelos de cargas estáticas	Efecto de incertidumbre en modelos de	Estabilidad de voltaje estático	Reducción de la carga de bajo voltaje (UVLS)	Límite de flujos de potencia	Colapsos en los sistemas de carga	Costos altos al simular grandes sistemas de potencia	Modelos de cargas estáticas	Modelos de carga dinámicas	Matriz Jacobiana	Modelos de cargas estáticas vs Modelos de	Metodo de colocación probabilística (PCM)	Estabilizador de lógica difusa (FLPSS)	Compensador estático VAR (SVC)	Teorema Thevenin	Teoría de evidencia D-S	Índice de estabilidad de voltaje rápido	Compensador de Serie Controlado (CSC)	Estación de carga EV	Método de Newton Raphson	Error de conversión del modelo de carga	Margen de estabilidad de voltaje relativo	Unidades de medición fasolia (PMU)	Modelación del sistema de potencia	Simulación de flujos de potencia mediante	Simulación de flujos de potencia mediante	Estabilidad transitoria de voltaje a largo	Estabilidad transitoria de voltaje a corto				
1	1994	Voltage stability analysis using generic dynamic load models	162	✗	✗		✗							✗					✗			✗	✗	✗														✗	✗	✗	✗					
2	2008	Dynamic modeling of induction motor loads for transient voltage stability studies	10	✗		✗	✗	✗					✗	✗	✗					✗	✗					✗	✗													✗	✗	✗	✗			
3	2007	Effect of Uncertainties in Parameters of Load Model on Dynamic Stability Based on Probabilistic Collocation Method	11	✗	✗		✗							✗		✗			✗				✗				✗													✗		✗	✗			
4	2017	Modeling of a multi-machine system aided with power system stabilizers and shunt compensator for transient stability enhancement	70	✗				✗					✗	✗						✗									✗	✗													✗			
5	2010	Using fuzzy logic power system stabilizer and static VAR compensator to improve power system transient stability	368	✗	✗										✗														✗	✗														✗		
6	2014	Modelling and Aggregation of Loads in Flexible Power Networks	0	✗	✗	✗	✗						✗	✗						✗	✗		✗	✗																			✗			

7.2 Resumen de Indicadores

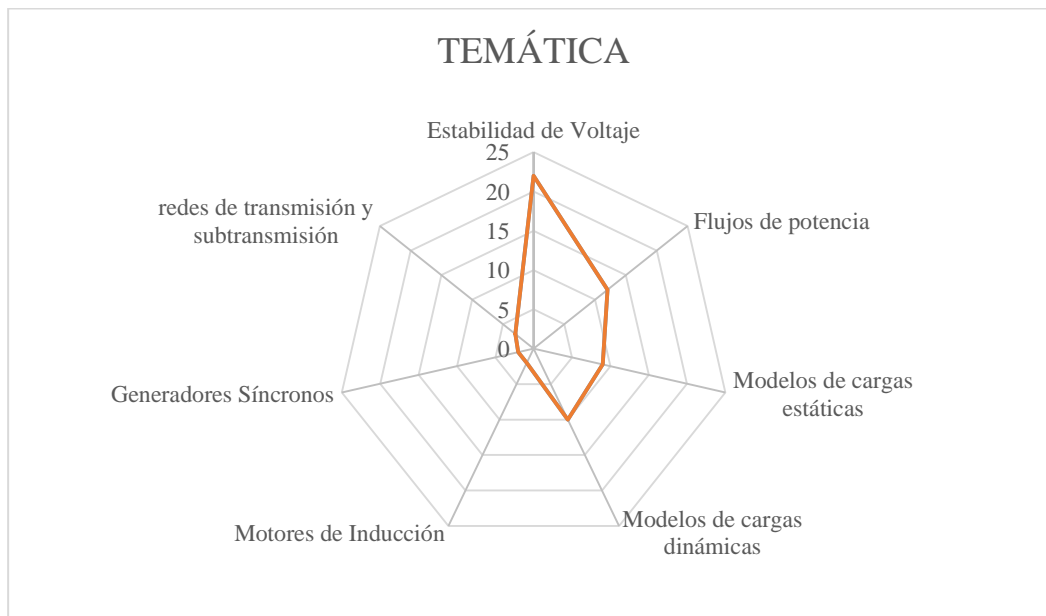


Figura 26. Resumen e indicador de la temática - Estado del arte

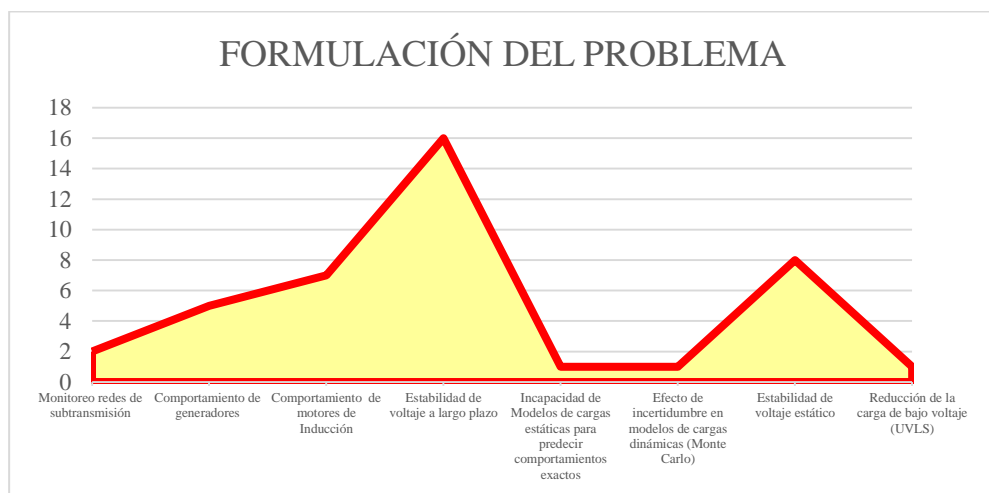


Figura 27. Indicador de formulación del problema - Estado del arte

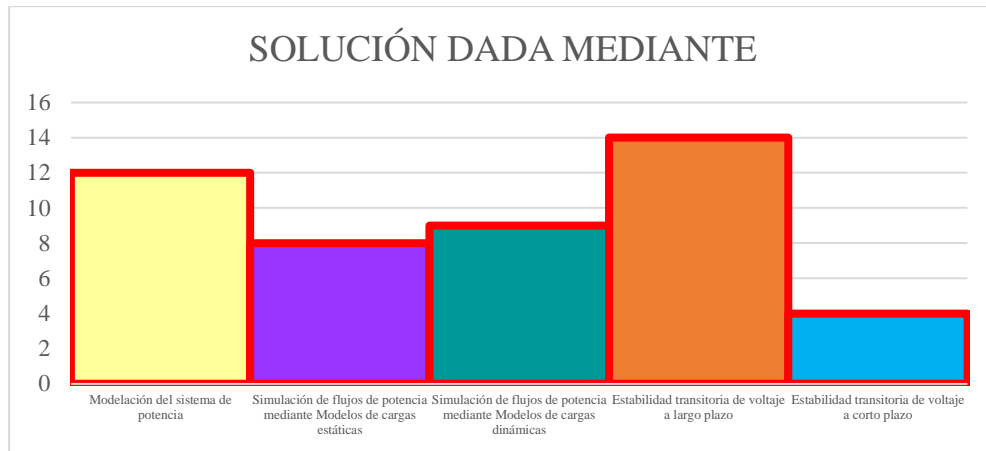


Figura 28. Indicador de solución - Estado del arte

8 Anexos

Tabla 2. Datos generales del Sistema IEEE de 39 barras

Datos del sistema IEEE 39 barras							
Barra N°	Voltaje	Cargas		Generador			
		P [MW]	Q [Mvar]	P [MW]	Q [Mvar]	Tipo	N°
1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	PQ	
2	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	PQ	
3	0.0000	322.00	2.4000	0.0000	0.0000	PQ	
4	0.0000	500.00	184.00	0.0000	0.0000	PQ	
5	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	PQ	
6	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	PQ	
7	0.0000	233.80	84.000	0.0000	0.0000	PQ	
8	0.0000	522.00	176.00	0.0000	0.0000	PQ	
9	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	PQ	
10	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	PQ	
11	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	PQ	
12	0.0000	7.5000	88.000	0.0000	0.0000	PQ	
13	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	PQ	
14	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	PQ	
15	0.0000	320.00	153.00	0.0000	0.0000	PQ	
16	0.0000	329.00	32.300	0.0000	0.0000	PQ	
17	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	PQ	
18	0.0000	158.00	30.000	0.0000	0.0000	PQ	
19	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	PQ	
20	0.0000	628.00	103.00	0.0000	0.0000	PQ	
21	0.0000	274.00	115.00	0.0000	0.0000	PQ	
22	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	PQ	
23	0.0000	247.50	84.600	0.0000	0.0000	PQ	
24	0.0000	308.60	-92.00	0.0000	0.0000	PQ	
25	0.0000	224.00	47.200	0.0000	0.0000	PQ	
26	0.0000	139.00	17.000	0.0000	0.0000	PQ	
27	0.0000	281.00	75.500	0.0000	0.0000	PQ	
28	0.0000	206.00	27.600	0.0000	0.0000	PQ	
29	0.0000	283.50	26.900	0.0000	0.0000	PQ	
30	1.0475	0.0000	0.0000	250.00	0.0000	PV	Gen10
31	0.9820	9.2000	4.6000	0.0000	0.0000	PV	Gen2

Datos del sistema IEEE 39 barras							
Barra N°	Voltaje	Cargas		Generador			
		P [MW]	Q [Mvar]	P [MW]	Q [Mvar]	Tipo	N°
32	0.9831	0.0000	0.0000	650.00	0.0000	PV	Gen3
33	0.9972	0.0000	0.0000	632.00	0.0000	PV	Gen4
34	1.0123	0.0000	0.0000	508.00	0.0000	PV	Gen5
35	1.0493	0.0000	0.0000	650.00	0.0000	PV	Gen6
36	1.0635	0.0000	0.0000	560.00	0.0000	PV	Gen7
37	1.0278	0.0000	0.0000	540.00	0.0000	PV	Gen8
38	1.0265	0.0000	0.0000	830.00	0.0000	PV	Gen9
39	1.0300	1104.0	250.00	1000.0	0.0000	PV	Gen1

Tabla 3. Datos de potencia utilizados para modelo de carga estático ZIP en el sistema IEEE de 39 barras

Modelo de carga estático ZIP							
N° carga	N° barra	Potencia activa			Potencia reactiva		
		p3	p2	p1	q3	q2	q1
1	3	0.5	0.25	0.25	0.25	0.25	0.5
2	4	0.6	0.2	0.2	0.2	0.2	0.6
3	7	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3	0.4
4	8	0.35	0.25	0.4	0.4	0.25	0.35
5	12	0.25	0.45	0.3	0.3	0.45	0.25
6	15	0.3	0.4	0.3	0.3	0.4	0.3
7	16	0.25	0.4	0.35	0.35	0.4	0.25
8	18	0.25	0.5	0.25	0.25	0.5	0.25
9	20	0.4	0.35	0.25	0.25	0.35	0.4
10	21	0.45	0.25	0.3	0.3	0.25	0.45
11	23	0.5	0.35	0.15	0.15	0.35	0.5
12	24	0.35	0.45	0.2	0.2	0.45	0.35
13	25	0.45	0.35	0.2	0.2	0.35	0.45
14	26	0.3	0.35	0.35	0.35	0.35	0.3
15	27	0.35	0.5	0.15	0.15	0.5	0.35
16	28	0.4	0.25	0.35	0.35	0.25	0.4
17	29	0.45	0.25	0.3	0.3	0.25	0.45
18	31	0.35	0.25	0.4	0.4	0.25	0.35
19	39	0.25	0.45	0.3	0.3	0.45	0.25

Tabla 4. Datos de potencia utilizados en el modelo de carga estático lineal del sistema IEEE de 39 barras

Modelo de carga estático lineal					
N° carga	N° barra	Potencia activa		Potencia reactiva	
		p3	p2	q3	q2
1	3	0.5	0.5	0.5	0.5
2	4	0.6	0.4	0.4	0.6
3	7	0.4	0.6	0.6	0.4
4	8	0.35	0.65	0.65	0.35
5	12	0.25	0.75	0.75	0.25
6	15	0.3	0.7	0.7	0.3
7	16	0.25	0.75	0.75	0.25
8	18	0.25	0.75	0.75	0.25
9	20	0.4	0.6	0.6	0.4
10	21	0.45	0.55	0.55	0.45
11	23	0.5	0.5	0.5	0.5
12	24	0.35	0.65	0.65	0.35
13	25	0.45	0.55	0.55	0.45
14	26	0.3	0.7	0.7	0.3
15	27	0.35	0.65	0.65	0.35
16	28	0.4	0.6	0.6	0.4
17	29	0.45	0.55	0.55	0.45
18	31	0.35	0.65	0.65	0.35
19	39	0.25	0.75	0.75	0.25

Tabla 5. Datos de potencia utilizados en el modelo de carga dinámico compuesto del sistema IEEE de 39 barras

Modelo de carga dinámico compuesto							
N° carga	N° barra	Potencia activa			Potencia reactiva		
		p3	p2	p3	p2	p3	p2
1	3	0.33	0.33	0.34	0.33	0.33	0.34
2	4	0.33	0.33	0.34	0.3	0.35	0.35
3	7	0.33	0.33	0.34	1	0	0
4	8	0.34	0.33	0.33	0.33	0.33	0.34
5	12	1	0	0	1	0	0
6	15	1	0	0	0.34	0.33	0.33
7	16	0.33	0.33	0.34	1	0	0
8	18	0.33	0.33	0.34	0.33	0.33	0.34
9	20	1	0	0	0.33	0.33	0.34
10	21	0.33	0.33	0.34	0.33	0.33	0.34
11	23	0	1	0	0.34	0.33	0.33
12	24	1	0	0	1	0	0
13	25	0.33	0.33	0.34	1	0	0
14	26	0.3	0.35	0.35	0.33	0.33	0.34

Modelo de carga dinámico compuesto							
N° carga	N° carga	Potencia activa			Potencia reactiva		
		p3	p2	p3	p2	p3	p2
15	27	1	0	0	0.33	0.33	0.34
16	28	0.33	0.33	0.34	1	0	0
17	29	1	0	0	0.33	0.33	0.34
18	31	0.34	0.33	0.33	0	1	0
19	39	1	0	0	1	0	0

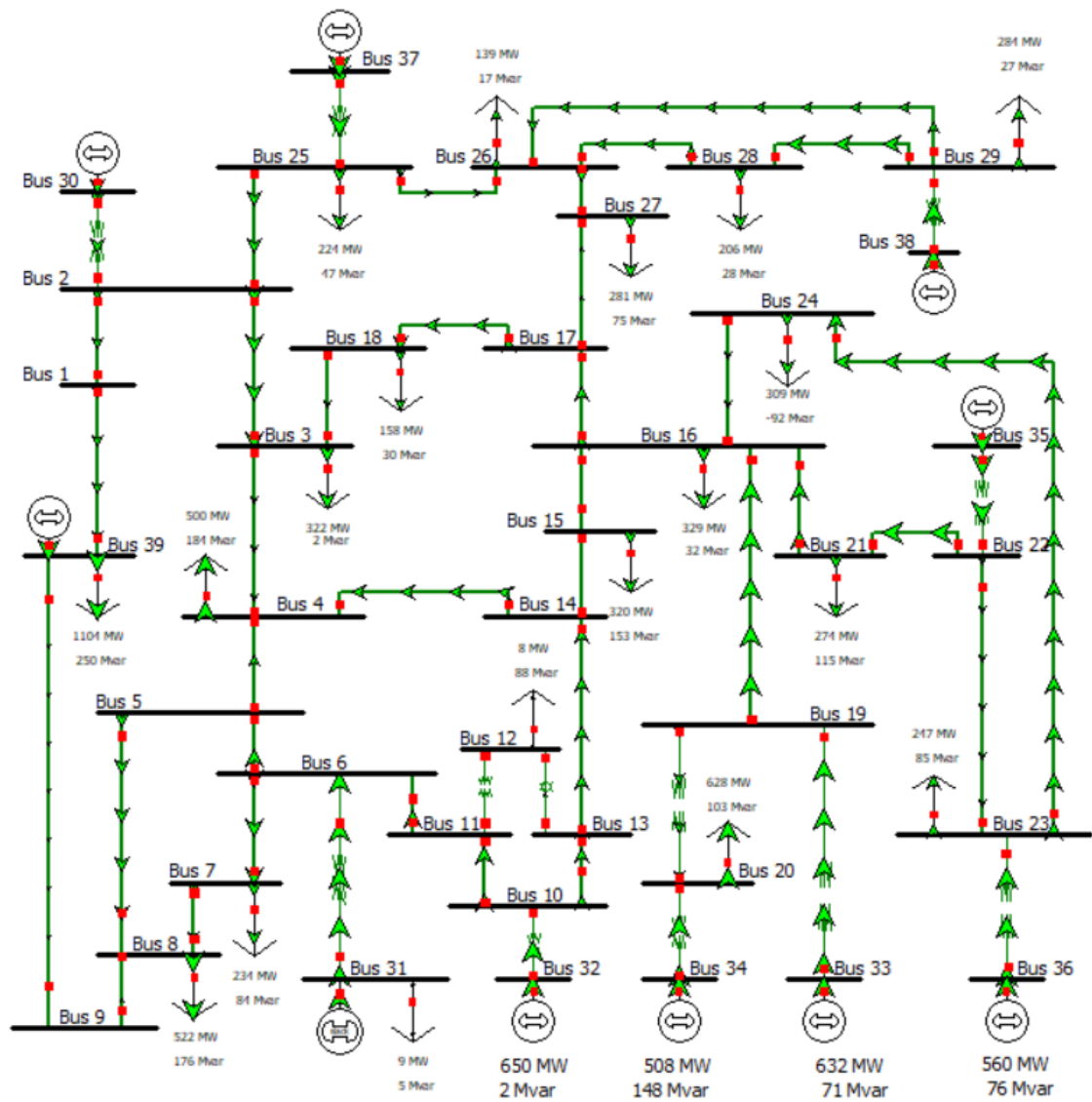


Figura 29. Sistema IEEE de 39 barras en PowerWorld

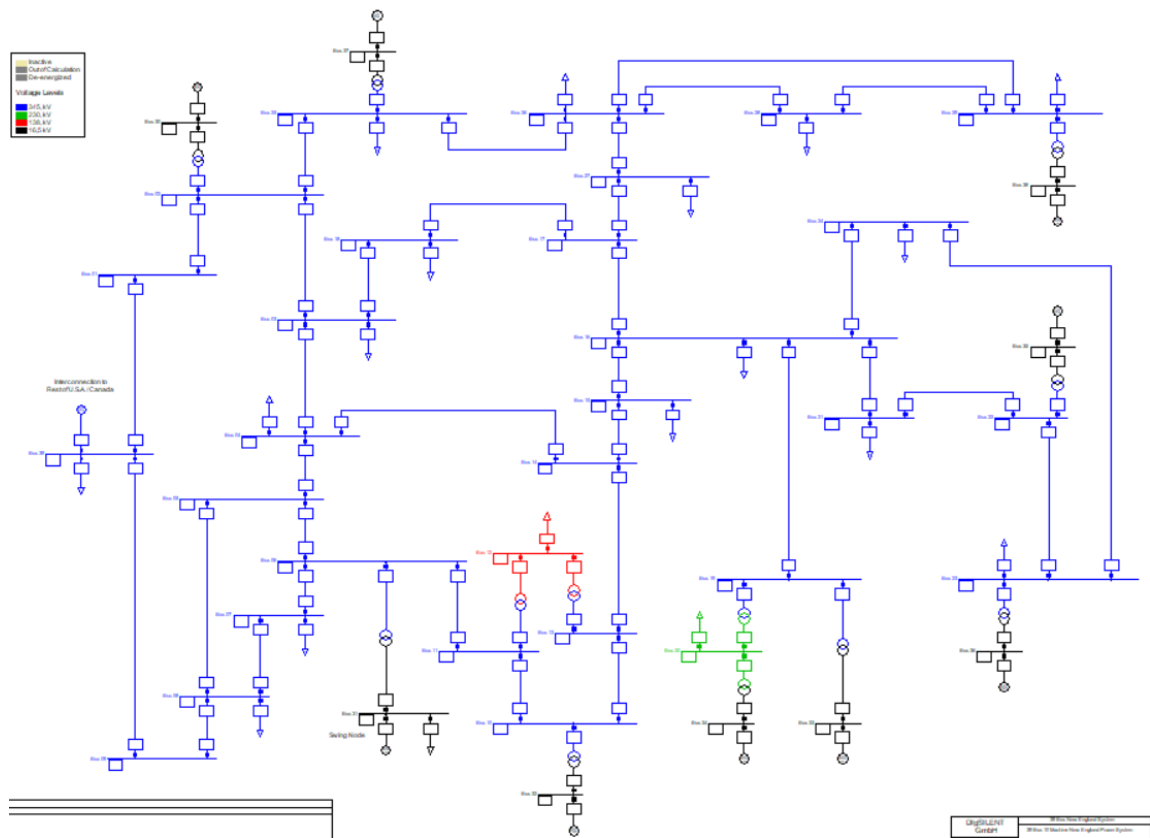


Figura 30. Sistema IEEE de 39 barras en DigSILENT PowerFactory